

Прецизионный измеритель направления магнитного поля

В.Н. Бочаров, А.В. Бублей, В.В. Пархомчук, В.С. Тупиков
Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера, Новосибирск, Россия

А.К. Кроуфорд, С.С. Нагайцев, А.В. Шемякин
Fermilab, Batavia, USA

Описан датчик, позволяющий контролировать направление магнитного поля в установках с электронным охлаждением с точностью $B_{\perp}/B_{\parallel} \sim 10^{-5}$. Основа датчика — магнитная стрелка с зеркалом, отражающим лазерный луч. Обсуждаются измерения с помощью этого датчика поперечных магнитных полей прототипа модуля соленоида системы электронного охлаждения, сооружаемой в Фермилабе.

Введение

Электронное охлаждение предъявляет высокие требования к параллельности траекторий электронов в секции взаимодействия с пучком охлаждаемых частиц [1]. В существующих установках электроны фокусируются продольным магнитным полем, и качество поля, а именно отклонение силовых линий от прямых, может определять эффективную поперечную температуру пучка и скорость охлаждения.

Для контроля качества поля в установке МОСОЛ (ИЯФ, Новосибирск) [2] был создан датчик, основанный на железной стрелке с прикреплённым зеркалом. Стрелка закреплялась в двухосевом шарнире, позволяющем датчику поворачиваться в двух направлениях и отслеживать направление магнитного поля. Изменения положения зеркала наблюдались с помощью промышленного оптического автоколлиматора. Позднее схожая конструкция использовалась и на других установках [3].

В проекте электронного охлаждения Фермилаба [4] задача изготовления соленоидов для охлаждающей секции [5] и измерения их полей имеет свою специфику. Соленоиды должны создавать магнитные поля 50–150 Гс. Для эффективного охлаждения интеграл поперечных полей не должен нигде на длине каждого модуля превышать величину 1 Гс·см. При этом точность измерения полей должна быть на уровне 1–3 мГс.

В настоящей работе описывается датчик, разработанный в ИЯФ для измерения полей этого соленоида и использующий ту же основную идею, что и в [2]. Однако низкое по сравнению с традиционными охладителями магнитное поле потребовало внести значительные изменения в конструкцию датчика, описываемые в 1-м разделе. Датчик был успешно использован для измерений магнитных полей прототипа модуля соленоида. Одним из результатов этих измерений явились оценки на погрешности датчика, представленные в 2-м разделе.

1. Устройство прибора

В устройстве [2] точность измерения поперечной компоненты поля ограничивалась в основном механическим трением в подшипниках. Величина угла α_{err} между истинным и измеряемым направлением поля может быть оценена как $\alpha_{err} \sim N_{fric}/(M \cdot B_0)$, где N_{fric} — момент силы трения; M — магнитный момент стрелки и B_0 — напряжённость ведущего магнитного поля. Поскольку величина M пропорциональна B_0 , точность падает как $1/B_0^2$, так что датчик, обеспечивающий измерение углов 10^{-5} радиан при $B_0 = 1$ кГс, обнаруживает ошибку только $4 \cdot 10^{-3}$ при 50 Гс.

Для кардинального улучшения точности при измерениях в малых полях в обсуждаемом датчике были изменены оба параметра в формуле для α_{err} . Во-первых, стрелка была изготовле-

на из постоянного магнита, что, согласно оценкам, примерно на порядок увеличило магнитный момент M при внешнем поле 100 Гс. Во-вторых, закрепление в подшипниках было заменено подвесом на нити, что, по-видимому, практически полностью исключило трение. Кроме того, вместо измерения углового отклонения зеркала датчика с помощью автоколлиматора сейчас используется оптический канал с лучом лазера (рис.1). На датчике смонтированы дипольные катушки (X и Y), которые компенсируют внешние поперечные поля так, что стрелка устанавливается в одном и том же направлении, а отражённый от зеркала лазерный луч приходит в одно и то же место фотодатчика. Мерой поперечных полей служат токи в компенсирующих катушках.

На рис.1 представлена блок-схема датчика. Магнитная стрелка образована двумя $NdFeB$ цилиндрами длиной 10 мм и диаметром 5 мм, зафиксированными в алюминиевой трубке. К этой же трубке прикреплены зеркала. Вся деталь (т.е. стрелка компаса) подвешивается с помощью тонкой нити, закрепленной на корпусе компаса. Эта сборка вставляется в капролоновую трубу (каретку) таким образом, что центр магнита находится на ее оси. Отражённый от зеркала лазерный луч принимается на четырехсекторный фотодиод, пары которого образуют X - и Y -каналы регистрации. Сформированные таким образом два сигнала для X - и Y -каналов являются сигналами ошибки, которые в случае включенной обратной связи поступают на входы интеграторов и далее на входы выходных усилителей, формирующих токи компенсирующих витков. Замкнутая петля обратной связи позволяет удерживать световое пятно в центре фотодиода, при этом токи в компенсирующих витках пропорциональны величинам поперечных компонент поля. Чтобы исключить из сигнала шумы, вызванные внешней засветкой, в схеме применена модуляция лазерного луча. Сигналы с фотодиода поступают на отдельные для каждого канала схемы дифференциатора-вычитателя, а затем синхронного детектора.

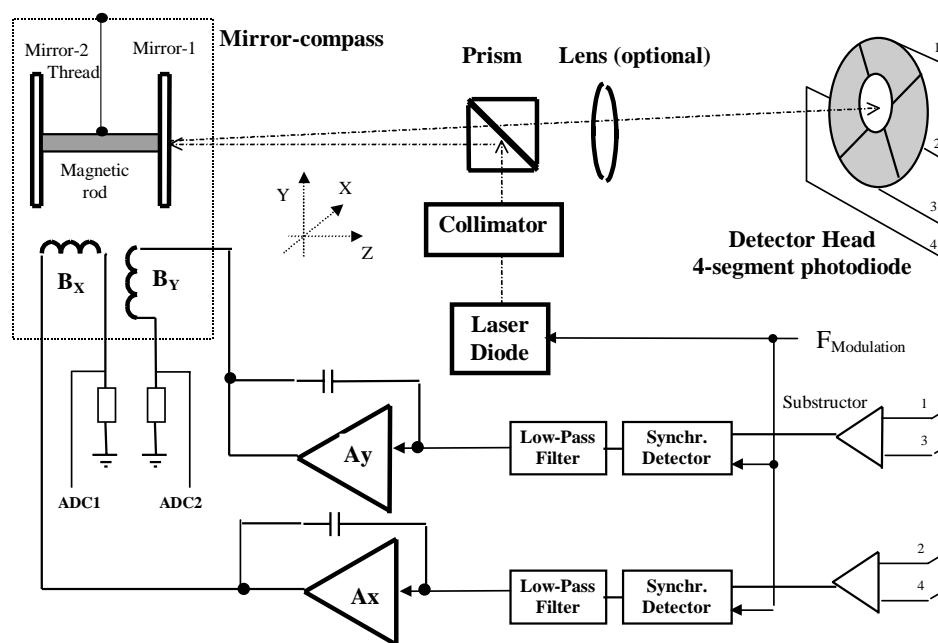


Рис. 1: Блок-схема измерительной системы.

Каретка фиксируется в поперечном направлении двумя струнами и может перемещаться на расстояние 20 м с помощью тяги и шагового двигателя. Значение продольной координаты отсчитывается по углу поворота двигателя, а абсолютная привязка осуществляется с помощью концевого выключателя, расположенного на одном из концов диапазона перемещений.

2. Калибровка и результаты измерений

Калибровка чувствительности системы проводилась с использованием длинного линейного проводника, расположенного снаружи соленоида параллельно его оси. Проводник смещался вертикально (для калибровки X -канала), либо горизонтально (Y) относительно оси датчика. Измеренные компенсационные токи с высокой точностью линейны по току проводника. Линейный коэффициент и расчёт поля проводника определяют калибровку.

Статистический анализ измерений, проведённых при фиксированных всех внешних параметрах, показывает, что распределение разбросов близко к гауссовому (рис.2). При напряжённости продольного поля 50 Гс без усреднений дисперсия составляет менее 0.5 мГс и менее 0.2 мГс при 10 усреднениях. Разброс определяется, по-видимому, несколькими факторами: отклонениями луча лазера от прямой из-за флуктуаций плотности воздуха, механическими колебаниями стрелки компаса, шумами электроники.

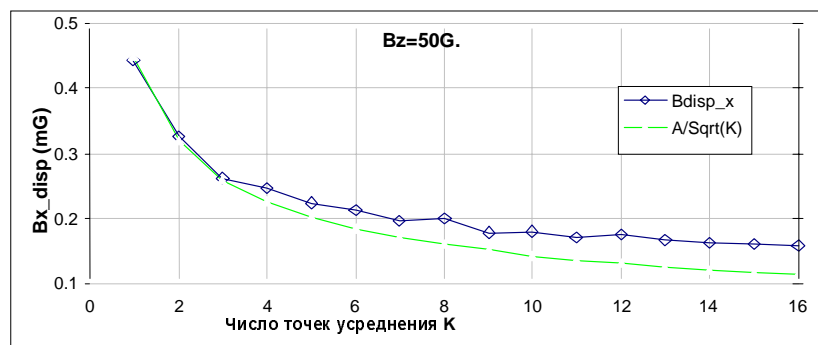


Рис. 2: Дисперсия результатов измерений поперечного поля B_x в зависимости от числа усреднений K .

Для проверки **долговременной стабильности** измерения поперечных полей 2-метрового соленоида были повторены несколько раз, и величины, измеренные в первом заходе, вычтены из данных последующих измерений. Полученные таким способом разности для интервалов времени между заходами 140 минут, 8 часов и 3 дня укладываются в ± 4 мГс по X и ± 8 мГс по Y . Возможно, что частично эти отклонения связаны с недостаточно жёстким закреплением соленоида относительно оптической системы и, в результате, с изменением со временем угла между его осью и лазерным лучом.

Причиной наибольшей **систематической погрешности** в измерениях оказалась неперпендикулярность плоскости зеркала и магнитной оси компаса. Возможно, что основная сложность связана с несовпадением механической оси постоянных магнитов, формирующих стрелку компаса, и оси его намагничивания. В результате такой неперпендикулярности в измерениях появляется дополнительная компонента поперечного поля, пропорциональная величине продольного поля, и, следовательно, постоянная по длине однородной части соленоида. В использовавшейся версии компаса это отклонение от перпендикулярности оказалось около 5 мрад, что не позволяло проводить измерения при значениях продольного поля выше 100 Гс.

Другой причиной систематической погрешности является наличие паразитных механических моментов, действующих на стрелку, выставленную по лазерному лучу. Такие моменты возникают из-за несовпадения вдоль оси Z точки подвеса и центра тяжести компаса или из-за остаточного после закрепления закручивания нити подвеса. В измерениях этот эффект проявляется, соответственно, как Y - и X -компоненты поперечного магнитного поля, не зависящие от напряжённости продольного поля.

Одной из особенностей измеряемого соленоида секции охлаждения является наличие зазоров между отдельными модулями. Продольное поле испытывает значительное возмущение в

зазорах, однако значение интеграла поперечного поля по зазору должно быть в высокой степени компенсировано. Использование датчика в неоднородном продольном поле оказалось ограниченным градиентом порядка 1 Гс/см из-за втягивания/выталкивания стрелки, поскольку при продольном смещении стрелка компаса задевала корпус датчика.

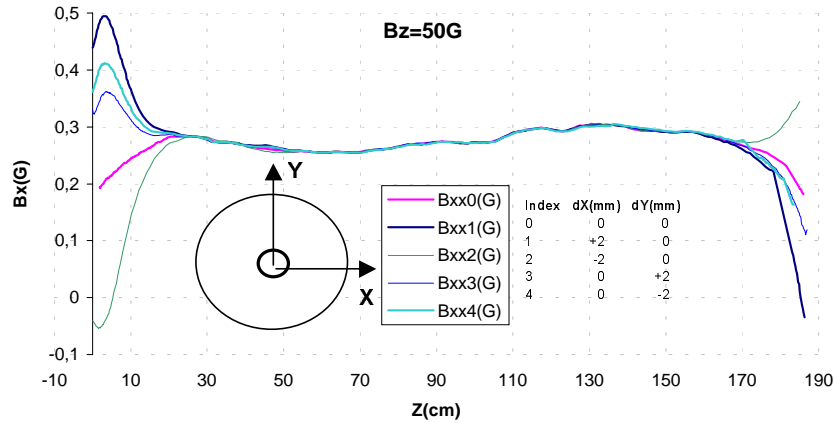


Рис. 3: Примеры измерений компоненты поля B_x вдоль соленоида при различных небольших смещениях вакуумной камеры относительно оси соленоида.

Заключение

В проведённых измерениях датчик показал работоспособность в полях 30–100 Гс. С его помощью удалось измерить собственные поперечные поля соленоида с точностью около 5 мГс и подобрать токи корректирующих дипольных катушек соленоида так, что интеграл поперечных полей на длине однородной части двухметрового модуля не превышает 0.2 Гс·см при величине продольного поля 50 Гс. Измеренная дисперсия ниже 0.5 мГс позволяет надеяться, что после проводимой в настоящее время модификации датчика он будет использован для измерений полей с точностью 1 мГс на всей 20-м длине будущего соленоида охлаждения.

Список литературы

- [1] В.В.Пархомчук, А.Н.Скринский. УФН т.170, № 5 сс.473-493, 2000.
- [2] А.Л.Арапов и др. Прецизионный соленоид для электронного охлаждения. Труды XIII Международ. конф. по ускор. частиц высоких энергий, Новосибирск, 1986, т.2, стр.341-343.
- [3] A.V.Bublei et al. New Technology for Production of Precision Solenoid for Electron Cooling Systems. Proc. of MEEC-98, Dubna, 1998, Russia.
- [4] FNAL R&D in medium energy electron cooling. By S.Nagaitsev, A.Burov, A.C.Crawford, T.Kroc, J.MacLachlan, G.Saewert, C.W.Schmidt, A.Shemyakin, A.Warner. Nucl.Instr. and Meth. A441(2000) pp. 241-245.
- [5] Cooling Section Solenoid for the 5 MeV Fermilab Electron Cooling Project, by S.Nagaitsev, A.C.Crawford, V.Kashikhin, A.Makarov, A.Shemyakin, V.Vostrikov. Proc. of EPAC_00, Vienna, 26-30 June 2000, pp. 2447-2449.